

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0417

近接基坑施工对既有隧道气囊桩的保护效果研究

倪福兴¹, 叶俊能², 陆 幸², 刘干斌^{1*}

(1. 宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315010)

摘要: 为研究高压气囊桩的布设方式对既有隧道的保护效果, 以 JD08 地块基坑施工对宁波轨道交通 3 号线区间隧道的影响为例, 通过建立基坑开挖对隧道影响的二维计算模型, 计算分析了气囊桩与隧道距离、气囊桩埋深、气囊桩加载压力对隧道水平和竖向位移以及其整体结构的影响, 并与实测结果进行对比。结果表明: 计算结果与实测结果较为接近, 基坑设计方案满足地铁保护要求; 气囊桩加载后, 隧道出现挤压回弹, 基坑开挖引起的隧道水平位移有所减小; 随着气囊桩长度的增加, 挤压作用更为明显, 隧道水平位移减小, 隆起增大, 横向收敛增大; 气囊桩与隧道间距以 3 m 为宜, 气囊压力以 800 kPa 为宜。

关键词: 近接基坑; 高压气囊桩; 既有隧道; 计算模型

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 05-0044-07

近年来, 邻近地铁线路工程建设越来越多, 基坑开挖施工使地铁隧道产生附加位移, 严重时甚至发生结构破坏, 已引起业界的广泛关注^[1]。温忠义等^[2]利用有限元模型建立了基坑围护结构变形与邻近地铁隧道相对位置、距离之间的关系。郑刚等^[3]对 4 种典型围护结构变形模式引起的坑外隧道变形特点进行了分析, 指出位移影响区范围随着围护结构最大水平位移的增加而扩大。为了确保地铁安全, 地铁隧道的变形限制越来越严格, 已从厘米级发展到毫米级。陈仁朋等^[4-5]分析了软土基坑分块开挖、被动区土体加固以及隔断墙措施的保护效果, 提出基坑中部位置对应区域为隧道重点保护区, 这与张治国等^[6]提出基坑分区开挖保护效果更好的结论一致。Zheng 等^[7]分析了隔震桩控制临近开挖隧道变形的效果。

针对近接地铁基坑工程, 分区卸荷法、隔断法、注浆加固等措施已大量应用到地铁保护中^[8-13]。尽管分区卸荷法、隔断法等被动保护措施应用广泛, 但是存在灵活性差、造价高等不足, 防护效果完全依赖预先的设计方案, 很难及时进行调整。为此,

国内外学者不断尝试新方法和新技术开展地铁保护。Zheng 等^[14]提出利用囊体扩张技术对土体实现变形控制, 该囊体使用材料为无延展性材料, 保护范围较小。倪福兴等^[15]提出了高压气囊桩地铁保护技术, 并采用模型试验研究了气囊排布方式对隧道的保护效果, 但是未讨论气囊桩埋深、气囊桩与隧道距离对既有隧道的保护效果。

本文针对高压气囊桩, 以 JD08 地块基坑对宁波轨道交通 3 号线区间隧道的影响为例, 分析基坑开挖对隧道变形的影响。在此基础上, 建立基坑开挖对隧道影响的二维计算模型, 讨论气囊桩与隧道距离、气囊桩埋深以及气囊桩加载压力的影响, 以为高压气囊桩对地铁隧道保护的应用提供技术支撑。

1 隧道变形监测

1.1 工程概况

JD08 地块基坑位于宁波市鄞州区, 西侧临近轨道交通 3 号线明楼站及区间隧道。本基坑工程占地总面积 104 283 m², 东侧为商业区域, 设二层地

收稿日期: 2023-04-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(52008214); 宁波市科技计划公益项目(202002N3116)。

第一作者: 倪福兴(1998-), 男, 浙江杭州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 软土地下工程. E-mail: 931824756@qq.com

*通信作者: 刘干斌(1976-), 男, 江西新干人, 教授, 主要研究方向: 软土地下工程. E-mail: liuganbin@nbu.edu.cn

下室, 西侧靠近轨道交通3号线, 局部为一层地下室. 该地块西南侧与明楼站东侧附属共用围护结构, 西侧一层地下室区域距隧道最近为 24.47 m, 最远为 28.05 m. 区间隧道顶部埋深约 11.3 m. 区间隧道与地下室之间的剖面 and 平面如图 1 所示.

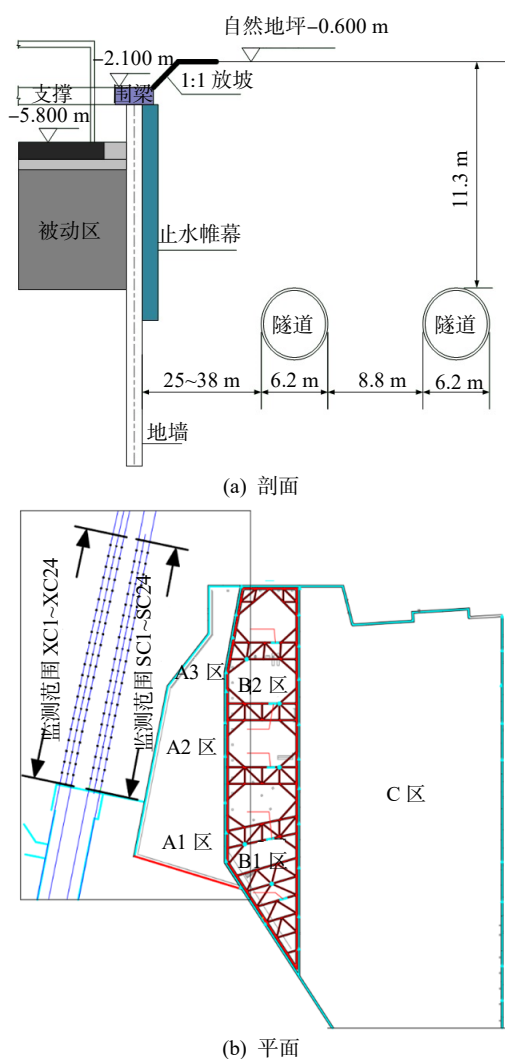


图1 隧道与基坑剖面 and 平面示意图

本基坑工程先施工远离地铁侧 C 区和靠近地铁侧一层地下室 A1 和 A3 区, 再依次施工 A2 区、B 区.

1.2 变形监测结果

在基坑开挖施工时, 对区间隧道进行变形监测, 选取靠近基坑的上行线隧道监测结果进行分析, 以得到在基坑开挖影响下隧道的变形特征. 在隧道内每隔 5 环(6 m)布置一个监测断面, 上行线隧道共布设 72 个测点, 截取基坑主要影响范围内的 24 个测点进行分析.

1.2.1 隧道水平位移

图 2 为基坑各分区开挖完成后隧道水平位移的变化. 从图 2 可见, 隧道水平位移随着各区域开挖整体增大, 最大位移出现在 17 号测点, 为 4.6 mm. 由于 C 区基坑距离隧道较远, 开挖面积较大, 在 C 区基坑开挖时, 隧道水平位移呈现先增后减趋势, 最大水平位移在 8 号测点, 为 1.45 mm, 最小水平位移在 24 号测点, 为 0.30 mm. A1、A2、A3 区域与隧道距离较近, 相关测点的水平位移较大. A1 区和 A3 区开挖时, 水平位移最大均在 18 号测点, 分别为 3.87 mm 和 4.1 mm; A2 区基坑开挖时, 17 号测点水平位移最大, 为 2.84 mm. B 区基坑位于 A 区和 C 区之间, 开挖面积较大, 17 号测点的水平位移最大, 为 4.87 mm.

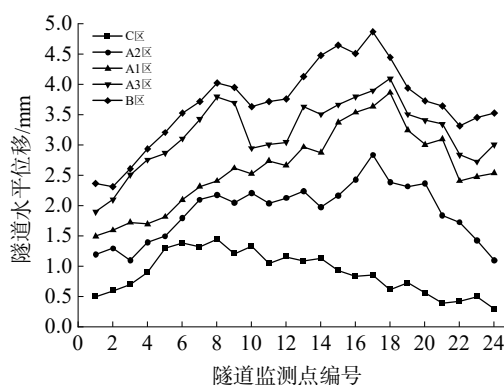


图2 隧道水平位移变化

1.2.2 隧道结构沉降

图 3 为基坑各分区开挖完成后隧道沉降的变化. 从图 3 可见, 随着各区基坑开挖, 隧道结构沉降逐渐增大, 最大沉降在 17 号测点, 为 -4.02 mm. 在 C 区开挖施工时, 隧道整体呈上浮趋势, 最大上浮位移发生在 2 号测点, 上浮量约为 1.00 mm. A1

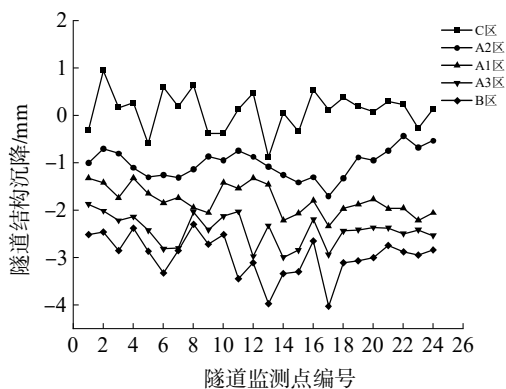


图3 隧道结构沉降变化

区开挖时隧道最大沉降量为 2.33 mm, A3 区开挖时隧道最大沉降量为 2.99 mm, A2 区开挖时隧道最大沉降量为 1.41 mm. B 区基坑位于隧道 A 区基坑和 C 区基坑之间, B 区开挖时隧道沉降增加了约 0.7 mm. 在整个影响范围内, 中部测点的沉降量较两端大, 隧道的沉降与基坑和隧道距离、开挖面积均有关.

1.2.3 隧道收敛

图 4 为隧道水平收敛的变化. 从图 4 可见, 隧道收敛变形最大值均出现在 17 号测点, 且最终呈水平正向收敛, 最大值 2.67 mm. 隧道收敛变形最终呈现“鸭蛋”状.

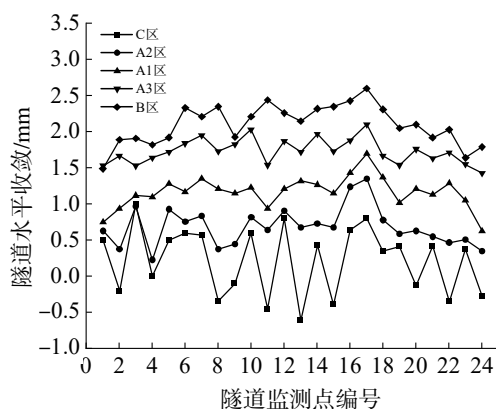


图 4 隧道水平收敛变化

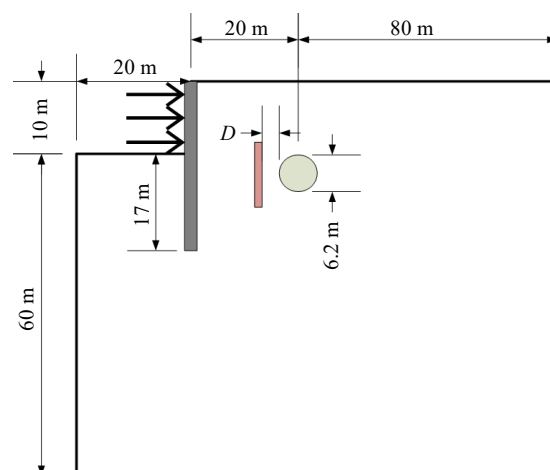
综上, 由监测结果可知, 本基坑开挖引起隧道的水平和竖向位移均小于 10 mm, 满足《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T202—2013)中对安全控制指标要求, 表明地铁保护设计方案合理.

2 气囊桩对既有隧道变形的影响模拟

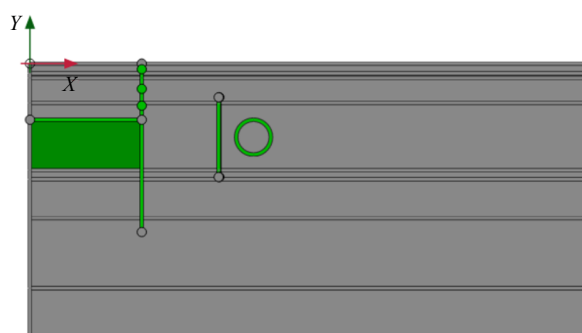
2.1 模型建立

为了探讨高压气囊桩对地铁保护新技术的效果, 以 JD08 地块基坑对 3 号线区间隧道的影响为例, 开展气囊桩对既有隧道变形的影响模拟. 实际上, 高压气囊桩对既有隧道变形影响是一个三维问题, 为了简化计算, 选取基坑对隧道最大影响剖面, 利用 Plaxis 软件建立基坑开挖对隧道影响的二维计算模型(图 5), 其中基坑开挖深度取 10 m, 开挖半宽度为 20 m; 地连墙厚 0.8 m, 嵌入坑底以下深度 17 m; 首道内支撑距地面 1 m, 其余支撑间距 3.5 m. 隧道外径 6.2 m, 内径 5.5 m, 隧道中心距基坑水平距离 20 m, 隧道顶部埋深取 10 m.

采用高压气囊桩对地铁隧道进行保护, 气囊桩与隧道外侧距离为 D . 考虑模型的对称性, 取 1/2 模型尺寸进行建模分析, 基坑外模型长度取 100 m, 坑底以下深度取 60 m, 基本可以消除边界效应的影响.



(a) 位置关系



(b) 有限元模型网格划分

图 5 气囊桩保护隧道计算模型

在模型中, 地下连续墙、钢筋混凝土支撑、气囊桩和既有隧道均采用板单元模拟, 土体的模拟采用平面应变单元, 土层采用 HSS 本构模型. 对地下连续墙和既有隧道附加界面单元. 为让有限元计算更加精确, 在隧道、基坑以及气囊桩周围通过加密网格提高计算收敛性, 模型网格划分为 4 549 个单元, 共 36 928 个节点. 盾构隧道被等效为均质圆环, 隧道采用错缝拼装, 隧道刚度有效率取 0.75. 隧道管片、地下连续墙和坑内水平支撑为钢筋混凝土材料, 采用线弹性本构模型模拟, 其重度为 $24.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 弹性模量为 30 GPa、泊松比为 0.2.

不考虑气囊桩作用, 基坑开挖至底后, 基坑的位移云图如图 6 所示, 其中围护结构的最大水平位移为 20.13 mm, 出现在深度 10 m 附近. 隧道的最

大水平位移约 7.93 mm, 小于围护结构位移, 略大于实测值 4.60 mm. 隧道最大沉降 4.21 mm, 略大于实测值 4.01 mm. 隧道的水平位移与竖向位移模拟值与实测值较为接近, 实测数据与有限元模拟值基本吻合.

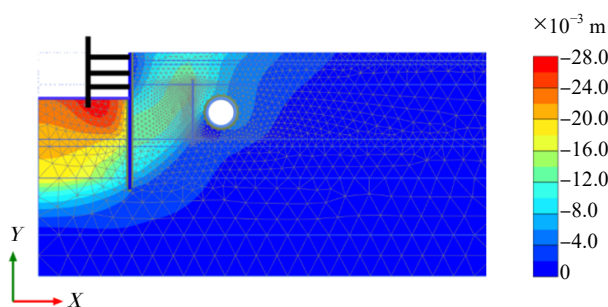


图6 基坑位移云图

2.2 模拟工况

考虑气囊桩与隧道的距离、气囊桩埋深以及气囊桩加载压力 3 个因素的影响.

2.2.1 气囊桩距离

气囊桩布设在基坑围护和隧道之间, 桩顶埋深 6 m, 桩长 14.2 m, 距隧道的水平距离分别取 3、6、9 m, 共 3 种工况.

2.2.2 气囊桩位置

基坑开挖引起围护结构和坑外土体向坑内位移, 进而带动隧道向坑内位移, 因此隧道位移与围护结构侧移有密切关系. 气囊桩桩顶、桩底的布设位置对既有隧道变形控制效果有一定影响. 在确定气囊桩最优距离后, 将气囊桩的埋深位置分为 3 种工况进行讨论. 工况 1 气囊桩桩顶埋深 6 m, 桩长 14.2 m; 工况 2 气囊桩桩顶埋深 6 m, 桩长 18.2 m; 工况 3 气囊桩桩顶埋深 10 m, 桩长 14.2 m.

2.2.3 气囊加载压力

在讨论气囊桩与隧道距离、气囊桩位置后, 进一步分析气囊加载压力的影响, 计算设定的加载压力分别为 600、700、800、900、1 000 kPa.

2.3 气囊桩参数对隧道变形影响

已有评价桩对隧道保护效果时, 主要是恢复隧道的位移, 但是仅用隧道位移的恢复率评判隧道的恢复效果有失公允, 因为隧道除了会产生刚性位移外, 也会发生一定程度的形变(椭圆度会发生变化). 本文用椭圆度表示气囊桩加压对隧道整体形变的纠正效果, 椭圆度越小说明气囊桩纠正

效果越好. 在设计气囊桩加压方案时, 需要使隧道位移(水平与竖向)与形变在最大程度上恢复到原有状态.

2.3.1 气囊桩距离的影响

考虑气囊桩加载压力为 800 kPa, 分析气囊桩距离对隧道和地下连续墙变形的影响. 图 7 和图 8 分别为不同气囊桩距离(D 为 3、6、9 m)时对隧道和地下连续墙变形的影响. 图中横纵坐标为隧道中心轴, 隧道直径为 6.2 m, 居中圆形为原始隧道, 左下侧的椭圆形分别为基坑开挖后以及气囊加压后隧道的形状和位置, 变形后隧道与原始隧道的坐标差值为变形放大 100 倍后的水平和竖直位移.

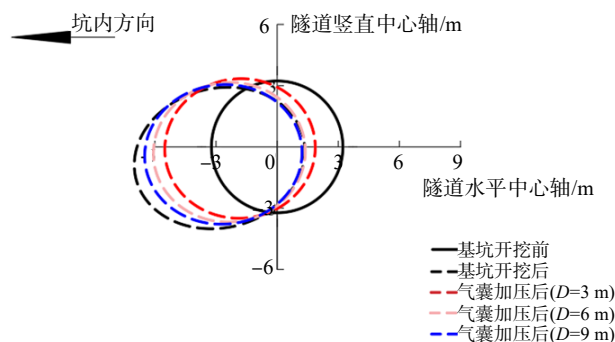


图7 气囊桩距离对隧道变形的影响(放大 100 倍)

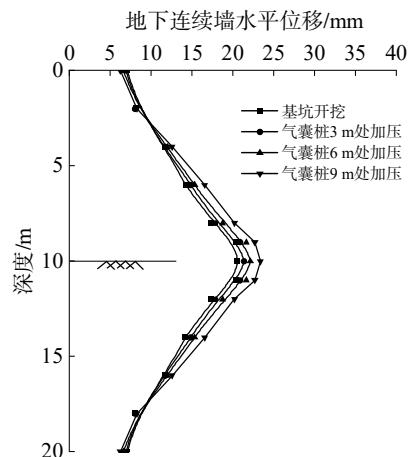


图8 气囊桩距离对地下连续墙变形的影响

从图 7 和图 8 可见, 基坑开挖完成后隧道变形呈现往基坑方向斜向下的椭圆形状, 隧道水平位移最大值为 7.93 mm, 开挖后隧道竖向位移最大值为 3.21 mm(沉降). 本文对基坑模型进行了简化, 数值计算仍与实测结果较为接近.

经计算发现, 对气囊桩加压后, 随着气囊桩与隧道距离逐渐减小, 隧道水平位移也不断减小, 即

隧道出现水平方向的挤压回弹. 在气囊桩与隧道距离为 3 m 时, 在气囊桩加压后, 隧道的水平位移从 7.93 mm 减至 3.22 mm. 基坑开挖完成后, 隧道顶部竖向位移为 1.6 mm. 在气囊桩加压后, 气囊桩与隧道距离从 9 m 减至 3 m 过程中, 隧道顶部竖向位移不断增大, 最终增至 3.7 mm, 在一定程度上加大了隧道隆起.

对地下连续墙, 基坑开挖完成后其水平位移最大值为 20.13 mm. 当气囊桩与隧道距离为 3、6、9 m 时, 气囊桩加压分别使地下连续墙的最大水平位移增至 21.35、22.12、22.47 mm. 综合隧道的水平位移、竖向位移, 后续计算取气囊桩与隧道间距为 3 m.

图 9 为隧道椭圆度在不同气囊桩与隧道外侧距离的变化规律. 从图 9 可知, 当气囊桩加载压力在 600~800 kPa 之间, 气囊桩位置与隧道越近, 加压后隧道的椭圆度越大, 表明隧道形变也越大. 同时, 随着距离的增大, 隧道椭圆度的增量也在衰减, 表明在隧道近处同样距离产生的影响远大于隧道远处距离. 当气囊桩与隧道距离为 3 m 时, 加压引起隧道的椭圆度最小, 说明此时隧道的恢复效果最好; 当气囊桩与隧道距离大于 3 m 时, 随着距离的增大, 椭圆度也增大, 所以气囊桩与隧道距离 3 m 适宜, 此时隧道的水平刚体位移恢复量和椭圆度恢复率均较大, 综合保护效果最好.

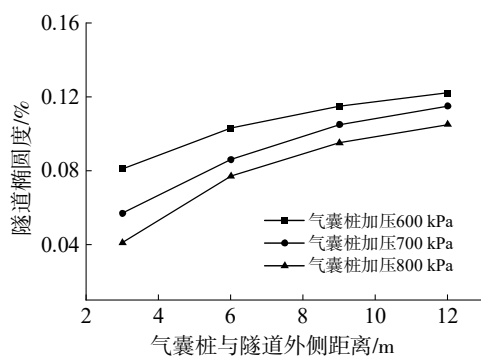


图 9 气囊桩加压后隧道椭圆度随距离的变化

2.3.2 气囊桩位置的影响

考虑气囊桩与隧道的间距为 3 m, 加载压力为 800 kPa, 分析气囊桩长度、气囊桩桩顶位置对隧道的保护效果. 工况 1 气囊桩深度为 -6~-20.2 m, 工况 2 气囊桩深度为 -6~-24.2 m, 工况 3 气囊桩深度为 -10~-24.2 m. 不同工况下隧道变形对比结果如

图 10 所示.

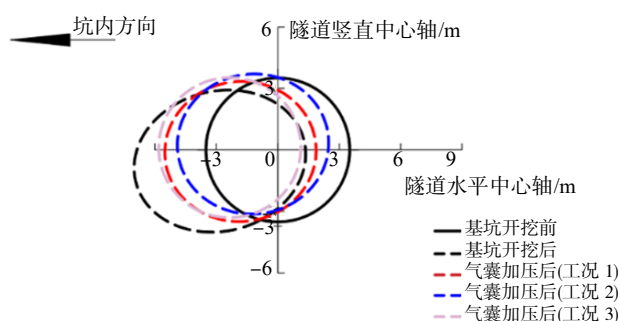


图 10 气囊桩加载 800 kPa 时隧道变形(放大 100 倍)

由于工况 1 和工况 2 气囊桩桩顶的埋深都为 6 m, 而工况 1 桩长 14.2 m, 工况 2 桩长 18.2 m, 计算结果发现, 加载后隧道产生背离基坑和气囊桩的位移; 随着气囊桩长度的增加, 气囊桩膨胀对隧道的挤压作用越加明显, 水平位移和隆起均有所增大, 隧道横向收敛增大. 对比工况 1 和工况 3, 2 种工况桩长均为 14.2 m, 工况 1 中气囊桩桩顶埋深 6 m, 工况 3 中气囊桩桩顶埋深 10 m. 从计算结果可知, 加载后隧道产生背离基坑和气囊桩位移, 工况 1 的水平位移大于工况 3.

图 11 为气囊桩加载引起不同工况下隧道椭圆度的变化规律. 当气囊桩埋深在 -6~-20.2 m 时, 隧道椭圆度最大, 原因是气囊桩加压引起隧道横向挤压变形. 工况 3 中气囊桩埋深为 -10~-24.2 m, 随着气囊桩移动到隧道中心线偏下, 尽管仍对隧道有一定的抬升作用, 但是横向挤压作用比抬升作用更为明显. 因此, 在气囊桩下移时, 挤压作用减小, 使得隧道整体椭圆度恢复较好.

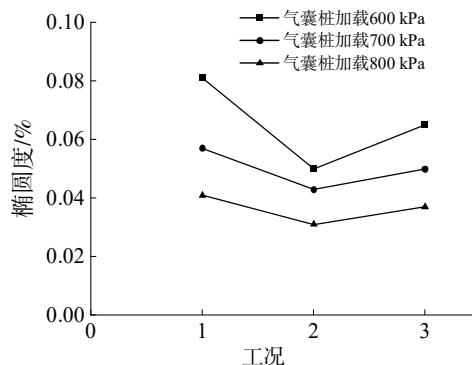


图 11 不同工况下气囊桩加载后隧道椭圆度的变化

综合工况 1~3 可见, 工况 2 气囊桩桩顶埋深为 6 m (桩顶位于隧道上方 4 m), 桩长 18.2 m 时, 气囊桩对隧道的保护效果最好.

2.3.3 气囊桩加载压力的影响

考虑气囊桩距离隧道为3 m,选择工况2气囊桩埋深范围-6~24.2 m,计算不同压力条件下,气囊桩对隧道水平位移及隧道整体形状的影响。

图12为气囊桩在不同加载压力下隧道的变形。从图12可见,气囊压力从600 kPa增大到800 kPa和1000 kPa时,隧道的最大水平位移产生一定量的水平回弹,最大值由5.46 mm减小到3.22 mm和2.63 mm,说明气囊桩压力可调节模型隧道的水平位移及隧道形状,起到保护隧道的作用。分析其机理,气囊加压后,气囊周边土体受到气囊膨胀产生的压应力,由弹性区逐渐变成塑性区,且随着气囊压力的增加,塑性区范围不断增大,且塑性区伴随气囊的体积膨胀发生位移。综合考虑加压条件和保护效果,认为气囊压力为800 kPa时较为理想(加载900、1000 kPa时,隧道的水平收敛较大)。

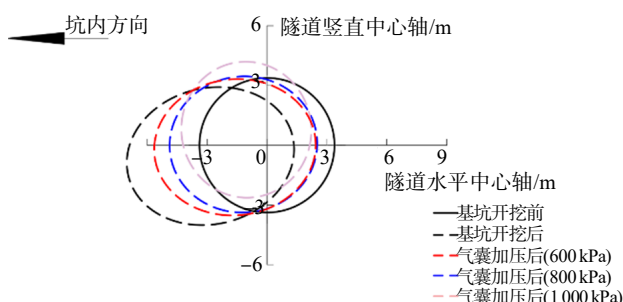


图12 气囊桩不同加载压力下隧道变形(放大100倍)

图13为隧道椭圆度在不同气囊桩加载压力下的变化规律。

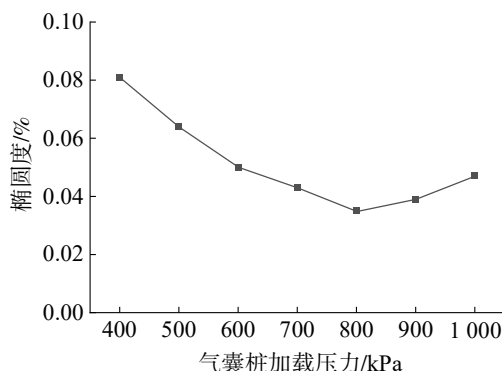


图13 气囊桩不同加载压力下隧道椭圆度变化

从图13可见,随着气囊桩加载压力增加,隧道椭圆度呈现先减后增趋势,当气囊桩加载压力达到800 kPa时,隧道椭圆度达到最低值,说明在气囊桩加载压力为800 kPa时,气囊桩对隧道整体

形变的恢复效果最好。

3 结论

(1)随着基坑各分区施工开挖,隧道最大水平位移为4.6 mm,最大沉降值为-4.02 mm,收敛最大值为2.67 mm,数值计算得到的隧道最大水平位移值为7.93 mm,与实测结果较为接近,满足地铁保护要求。

(2)气囊桩与隧道的间距对隧道位移的影响较为显著,随着间距的增大,气囊桩对隧道的纠偏效果随之减弱,气囊桩与隧道间距在3 m左右时对隧道的水平位移控制较好。

(3)加载后,隧道产生背离基坑和气囊桩的水平位移,且随着气囊桩长度的增加,气囊桩膨胀对隧道的挤压作用越加明显,水平位移和隆起均有所增大,隧道横向收敛增大。气囊桩桩顶埋深为6 m(桩顶位于隧道上方4 m),桩长18.2 m时,气囊桩对隧道的保护效果最好。考虑加载条件和保护效果,本次模拟中加载压力800 kPa较为理想。

参考文献:

- [1] 李连祥,张强,石锦江,等. 基坑开挖邻近隧道水平位移规律[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(1): 46-52; 59.
- [2] 温忠义,张丽娟,陈松,等. 基坑支护结构变形对邻近地铁隧道的影响研究[J]. 路基工程, 2014(5):144-148.
- [3] 郑刚,王琦,邓旭,等. 不同围护结构变形模式对坑外既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7):1181-1194.
- [4] 陈仁朋,孟凡衍,李忠超,等. 邻近深基坑地铁隧道过大位移及保护措施[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(5):856-863.
- [5] Chen R P, Meng F Y, Li Z C, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 224-235.
- [6] 张治国,徐晨,刘明,等. 考虑基坑降水开挖影响的运营隧道变形分析[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 241-248.
- [7] Zheng G, Wang F J, Du Y M, et al. The efficiency of the ability of isolation piles to control the deformation of tunnels adjacent to excavations[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10):1475-1490.

- [8] Kontogianni V A, Stiros S C. Induced deformation during tunnel excavation: Evidence from geodetic monitoring[J]. *Engineering Geology*, 2005, 79(1/2):115-126.
- [9] 郑刚, 潘军, 程雪松, 等. 基坑开挖引起隧道水平变形的被动与注浆主动控制研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(7):1181-1190.
- [10] 孙文昊, 范东方, 胡威东, 等. 新建地下通道时下方地铁隧道保护方案研究[J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(12): 86-91.
- [11] 王康任, 庞小朝, 顾问天, 等. 基岩注浆截水帷幕在城市 40m 超深基坑工程及紧邻地铁保护中的应用[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(S1):220-225.
- [12] 周丁恒, 田雪娟, 李长安, 等. 暗挖地铁隧道下穿高速铁路隧道保护措施研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(9):86-91; 108.
- [13] 郇亮, 刘干斌, 陆幸, 等. 邻近基坑开挖地铁隧道的注浆保护试验与数值模拟[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(S1):387-396.
- [14] Zheng G, Su Y M, Diao Y, et al. Field measurements and analysis of real-time capsule grouting to protect existing tunnel adjacent to excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 122:104350.
- [15] 倪福兴, 叶俊能, 刘干斌, 等. 近接基坑开挖对既有隧道变形影响及控制研究[J]. *防灾减灾学报*, 2023, 39(1): 53-61.

Protection of metro tunnel by airbag pile in construction of adjacent foundation pit

NI Fuxing¹, YE Junneng², LU Xing², LIU Ganbin^{1*}

(1.Institution of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315010, China)

Abstract: High pressure airbag pile is a new technology for metro protection. In order to study the protection effect of high pressure airbag pile arrangement on existing tunnel, the influence of foundation pit on Ningbo Rail Transit Line 3 tunnel in JD08 is taken as an example, whereby a two-dimensional calculation model of the influence of foundation pit excavation on the tunnel is established, the effects of the distance between the airbag pile and the tunnel, the buried depth of the airbag pile and the loading pressure of the airbag pile on the tunnel deformation are calculated and analyzed, and the calculated results are compared with the measured results. The results show that the calculated results are close to the measured results, and the design scheme of the foundation pit meets the requirements of metro protection. The tunnel extrusion rebound occurs after the airbag pile is loaded, and the tunnel horizontal displacement caused by foundation pit excavation decreases, with the increase of airbag pile length, the tunnel horizontal displacement decreases, the uplift increases, and the lateral convergence increases. It is preferred the distance between airbag pile and tunnel to be 3 m, and the airbag pressure to be 800 kPa.

Key words: adjacent foundation pit; high-pressure airbag pile; existing tunnel; model

(责任编辑 史小丽)